

論文 アンケート調査に基づく塩害劣化 RC 橋の健全性評価

岸 紗百合^{*1}・森川 英典^{*2}

要旨：劣化した多数の橋梁を合理的に維持管理するために、その合理的かつ客観的な評価手法の構築が求められている。本研究は橋梁の評価手法の一つとして、特に塩害劣化した RC 橋に対して、橋梁管理者を対象に行ったアンケート調査に基づく橋梁の健全性評価手法の分析を行うとともに評価モデルを作成し、詳細な安全性評価解析の結果と比較検証した。多変量分析によって、アンケート調査結果の分析を行った結果、管理者の判断基準、傾向が明らかとなり、これにより得られた結果を用いて、塩害劣化 RC 橋の簡易健全性評価が行えるものと思われる。

キーワード：塩害，RC 橋，アンケート調査，健全性，維持管理，管理者

1. はじめに

近年、塩害劣化 RC 橋の早期劣化が問題となっており、維持管理の重要性が高まっている。しかしながら、合理的な維持管理において重要となってくる塩害劣化 RC 橋の健全性、余寿命評価を始めとする現状評価に関するものは技術者の主観によるものが多く、その基準のあいまいさが問題となっている。そこで塩害劣化した RC 橋の状態を合理的、客観的に評価していく段階的な手法およびプロセスの構築が求められている。

また、多数の塩害劣化した RC 橋を合理的に維持管理していくためには、橋梁の劣化度の順位付けを短期間でかつ経済的に行う必要がある。そのため実験、点検、解析結果に基づく詳細な評価方法の他に比較的簡易な方法により橋梁の健全度を簡易に評価する手法の構築も必要となってくる。点検レベル、経済性等に応じて適宜詳細な手法と簡易な手法による評価手法を適用することにより合理的な維持管理が行われるものと考えられる。

塩害劣化した RC 橋の状態を評価する手法の研究に関して、詳細な手法から簡便な手法まで、評価手法の検討を行ったいくつかの研究がある。実際の橋梁を調査したデータに基づいて、経時

変化を考慮した劣化予測、安全性評価を行い、橋梁の状態を評価する小島ら¹⁾の研究や、実橋における変状などを評点化することにより、橋梁の状態を評価する評点法に関する尾崎ら²⁾の研究がある。

これら既往の研究に対して、本研究では橋梁の管理者を対象にし、2 橋の塩害劣化 RC 橋に対して健全性に関するアンケート調査を行い、そのデータをもとに多変量分析を用いて評価手法の分析、評価モデルの作成を行った。今回は得られたサンプル数が少ない中でも、管理者の評価の傾向を分析するために、はじめに数量化類分析を用いて評価を行い、その結果をもとに重回帰分析を用いて評価を行うこととした。カテゴリ分けを行い、分析することにより少ないサンプルからも傾向を読み取ることが可能であると考えられる。多変量分析により、実際の維持管理技術者の経験に基づいた評価・判定のプロセスと結果をアンケート調査により抽出し、現行の維持管理の基準を把握するとともに、それに含まれるばらつきなどの不確定要因を分析する。またこれらの結果を詳細な評価による結果と対応させ、アンケート調査による評価の有効性の検討も行った。

*1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻 (学生員)

*2 神戸大学工学部建設学科教授 博士 (工学) (正会員)

2. アンケート調査の概要について

2.1 対象橋の概要

本研究においては、塩害環境下に位置するRC-T桁橋を対象としている。実橋の例としてA、B橋を取り上げ、諸元を表-1に、概略図を図-1に示す。A橋は、橋齢45年時に実橋調査を行った結果、橋梁全体に腐食ひび割れが見られ、A桁とB桁では鉄筋腐食によるコンクリートのはく落部分が部分的に確認できるほど劣化が進行している状況にあった。B橋は、橋齢50年時に実橋調査を行った結果、増桁のX桁以外の桁には鉄筋の腐食によるひび割れ、浮きと見られるものが広い範囲で確認できた。なおB橋においては今回の調査後架け替えが行われている。

2.2 アンケート調査の概要

アンケート調査は管理者を対象として行われた。A橋では6人、B橋では13人の回答があった。B橋においては3径間あるが、今回アンケートの対象としたのは最も左岸側のスパン1のみである。図-2にアンケート調査の質問の流れを、また表-2にアンケート調査の質問内容について示す。主桁は各桁について質問し、床版は各質問に対して最も劣化の激しいパネルを選択

し回答することにした。

アンケート調査時では各質問に対して100点満点での評価で行ったが、各変状に対する質問（第1段階）の点数化には図-3に示すような方法で行った。の質問に関する評価については最も危険に見るところを1.0とし、他に関しては、影響度が小さくなるように点数の重み付けを行った。

3. アンケート調査結果の多変量分析

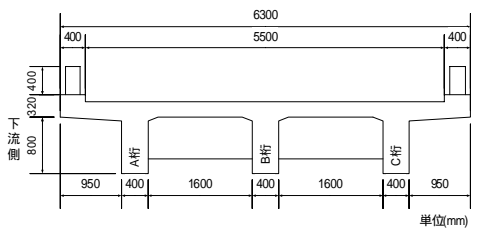
3.1 分析の概要

アンケート調査は図-2、表-2に示すように主桁、床版について行ったが、重量車両交通量も少なく、床版の疲労による劣化は軽微であること、また塩害による劣化も床版は軽微なひび割れが確認されるのにとどまっているのに対して、主桁は浮き、鉄筋露出をはじめとする大きな劣化が見られるなど、床版に対して主桁の劣化が支配的であった。そのため今回多変量分析を行うのは、主桁のデータおよび全体の健全性、余寿命についてのみとした。

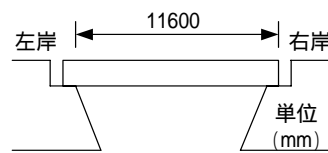
今回の分析の流れとしては図-4に示すとおりであり、説明変数、目的変数間の関係性を調べるために数量化 類分析³⁾、重回帰分析による多変量分析を行った。その際に必要となるデータのカテゴリ分けについてもあわせて図-4に示す。

表-1 A橋, B橋の諸元

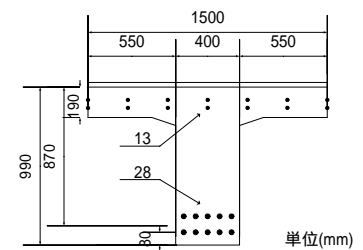
	A橋	B橋
建設年度(年)	1959	1954
コンクリート強度(N/mm ²)	35.7	14.7
海岸からの距離(m)	約50	約700
交通量(12時間)(台)	962	9119



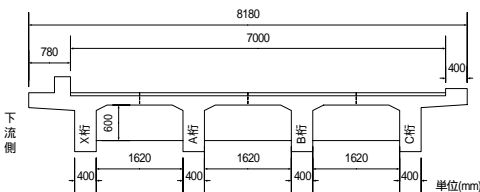
(a)A橋断面図



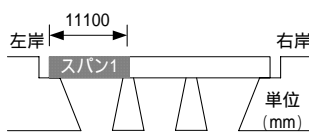
(b)A橋側面図



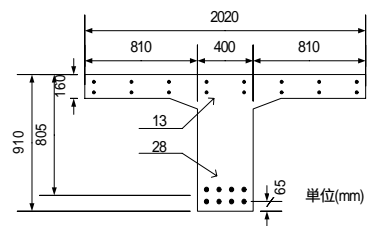
(c)A橋主桁断面図



(a)B橋断面図



(b)B橋側面図



(c)B橋主桁断面図

図-1 A, B橋概要図

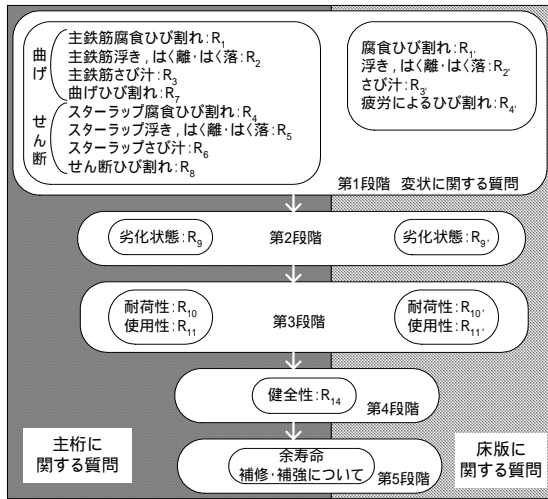


図-2 アンケート調査の質問の流れ

表-2 アンケート調査の質問

質問対象	質問内容	変数表示	曲げ/せん断	
1. 主桁	主鉄筋	1. 腐食ひび割れについて 有無の確認 発生範囲 幅	R ₁	曲げ
		2. 浮き、はく離・はく落について 有無の確認 発生範囲 幅	R ₂	曲げ
		3. さび汁について 有無の確認 発生範囲 幅	R ₃	曲げ
	スターラップ	4. 腐食ひび割れについて 有無の確認 発生範囲 幅	R ₄	せん断
		5. 浮き、はく離・はく落について 有無の確認 発生範囲 幅	R ₅	せん断
		6. さび汁について 有無の確認 発生範囲 幅	R ₆	せん断
		7. 曲げひび割れについて 有無の確認 発生範囲 幅	R ₇	曲げ
		8. せん断ひび割れについて 有無の確認 発生範囲 幅	R ₈	せん断
2. 床版	9. 劣化状態について	R ₉	**	
	10. 耐久性について	R ₁₀	**	
	11. 使用性について	R ₁₁	**	
3. 全体	1. 健全性について	R ₁₂	**	
	2. 補修・補強について	R ₁₃	**	
	3. 回答者立場	**	**	
	4. 回答者	**	**	
	5. 他	**	**	
	6. 橋梁に携わった年数	**	**	
	7. アンケートについての意見	**	**	

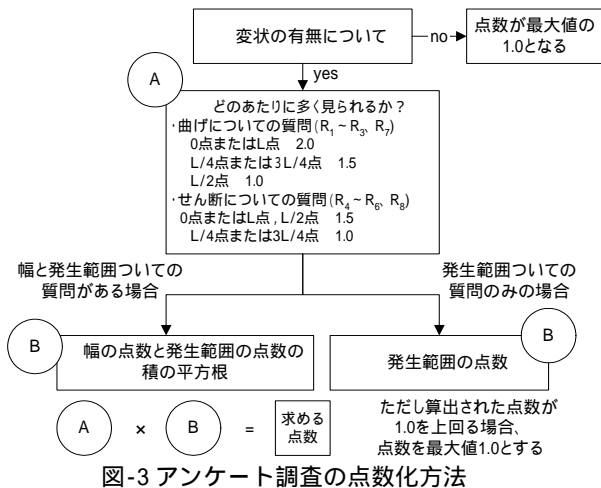


図-3 アンケート調査の点数化方法

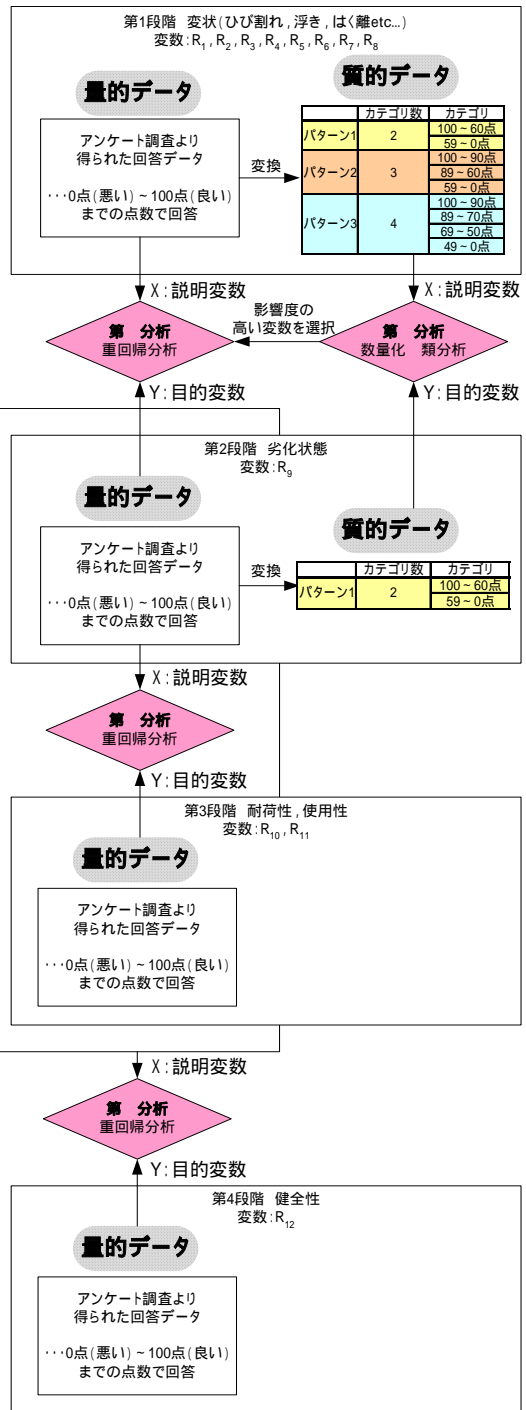


図-4 分析の流れおよびカテゴリ分けについて

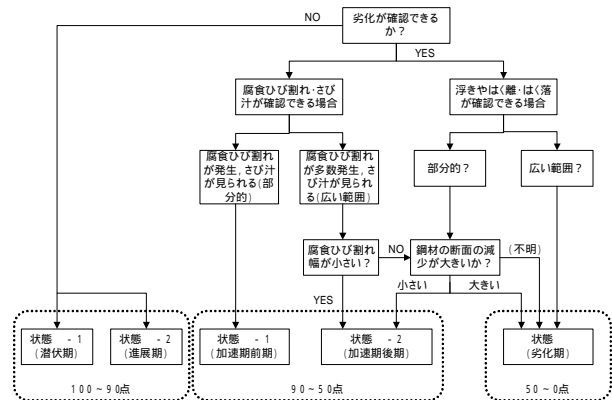


図-5 塩害・中性化による劣化の判定手順⁴⁾

このカテゴリ分けは、今回アンケート調査で得られた量的データを数量化分析に適するように質的データに変換する作業である。カテゴリ分けについては、アンケート調査を行った際に参考資料として添付したもの⁴⁾(図-5 参照)を参考にして行った。このとき目的変数にあたる劣化状態のカテゴリを2つに分けたのは、目的変数にあたるものが段階的に表されているものをカテゴリ分けする際に2つに区分するほうがより顕著な結果が得られるからである⁵⁾。

3.2 主桁劣化状態判定要因における多変量分析

(1) はじめに

ここでは、主桁の劣化状態を判断する際に影響を与えてくる数々の要因の中でも、主桁の変状に着目して定量的な分析を行った。得られたサンプル数が少ないので、はじめに数量化 類分析を用いて評価を行い、その結果をもとに再度重回帰分析を用いて評価を行うこととした。

(2) 主桁劣化状態判定要因における数量化 類分析

図-4の“第1段階”に示す3つのパターン全てに、 R_9 (劣化状態)を目的変数、 $R_1 \sim R_8$ (各変状)を説明変数とし、数量化 類分析を行った。その結果と各カテゴリ間のサンプル数の配分などより、パターン2が最も適切なカテゴリ分けである事がわかった。図-6と表-3にパターン2における結果を示す。表-3(a)は全変数の場合(ただし図-6より、2つのカテゴリにおいてサンプルが0である R_3 は初めより分析から除いている)を示し、表-3(b)は表-3(a)の結果をもとに変数を絞りこみ分析を行った結果である。

変数選択の結果およびアイテムレンジの大きさより、 R_1, R_2, R_4, R_7 の4変数が、橋梁管理者が主桁の劣化状態を判断する際において、特に考慮されている項目と考えられ、せん断・スタールラップに関する要素(R_4, R_5, R_6, R_8)よりも、曲げ・主鉄筋に関する要素(R_1, R_2, R_3, R_7)の方をより重視している事が言える。表-3(b)のアイテムレンジに着目すると、その中でも特に R_1, R_2 の変状を最も考慮している事がわかる。

また、表-3(a)の R_5, R_6 のカテゴリスコアを見ると、本来良い状態であれば正の方向に大きくなるカテゴリスコアの値の順序が逆転している事がわかる。この原因としては、カテゴリ間のサンプル数の著しい偏りあげられる。今回、調査を行った2橋は、同時に行った現場試験結果から加速期であると考えられ、比較的状态の似た橋であり、今後、異なった劣化状態の橋に対して調査を行う事で改善されると考えられる。

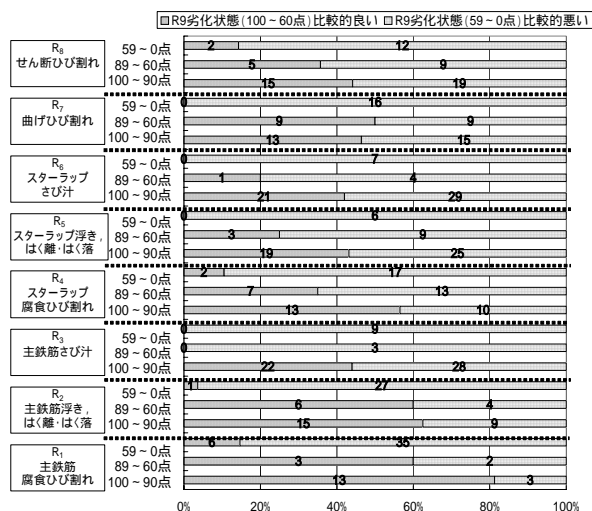


図-6 主桁の変状と劣化状態の関係 (パターン2)

表-3 数量化 類分析結果 (パターン2)
(a) 全変数の場合 (ただし R_3 除く)

要因	カテゴリ	例数			カテゴリスコア	レンジ	偏相関係数
		劣化状態 (100-90点)	劣化状態 (59-0点)	全体			
R_1 (主鉄筋腐食ひび割れ)	100-90点	13	3	16	0.5420	0.7834	0.3079
	89-60点	3	2	5	-0.2445		
	59-0点	6	35	41	-0.2413		
R_2 (主鉄筋浮き、はく離、はく落)	100-90点	15	9	24	0.5133	1.1113	0.4810
	89-60点	6	4	10	0.4422		
	59-0点	1	27	28	-0.5979		
R_4 (スタールラップ腐食ひび割れ)	100-90点	13	10	23	0.4326	0.7333	0.3512
	89-60点	7	13	20	-0.2118		
	59-0点	2	17	19	-0.3007		
R_5 (スタールラップ浮き、はく離、はく落)	100-90点	19	25	44	-0.1043	0.3922	0.1607
	89-60点	3	9	12	0.2385		
	59-0点	0	6	6	0.2879		
R_6 (スタールラップさび汁)	100-90点	21	29	50	-0.0547	1.4176	0.3104
	89-60点	1	4	5	-0.5390		
	59-0点	0	7	7	0.8185		
R_7 (曲げひび割れ)	100-90点	13	15	28	0.1719	1.1456	0.4067
	89-60点	9	9	18	0.3975		
	59-0点	0	16	16	-0.7480		
R_8 (せん断ひび割れ)	100-90点	15	19	34	0.1635	0.3639	0.2064
	89-60点	5	9	14	-0.1967		
	59-0点	2	12	14	-0.2004		
相関比		0.6375					
軸の重心		第1群 1.0679					
		第2群 -0.5873					
的中率		90.3					

(b) 変数選択後の場合

要因	カテゴリ	例数			カテゴリスコア	レンジ	偏相関係数
		劣化状態 (100-90点)	劣化状態 (59-0点)	全体			
R_1 (主鉄筋腐食ひび割れ)	100-90点	13	3	16	0.6954	0.9880	0.3859
	89-60点	3	2	5	0.1744		
	59-0点	6	35	41	-0.2926		
R_2 (主鉄筋浮き、はく離、はく落)	100-90点	15	9	24	0.3652	1.0685	0.4292
	89-60点	6	4	10	0.5566		
	59-0点	1	27	28	-0.5118		
R_4 (スタールラップ腐食ひび割れ)	100-90点	13	10	23	0.2992	0.5206	0.2507
	89-60点	7	13	20	-0.2215		
	59-0点	2	17	19	-0.1291		
R_7 (曲げひび割れ)	100-90点	13	15	28	0.1118	0.8434	0.3458
	89-60点	9	9	18	0.3048		
	59-0点	0	16	16	-0.5386		
相関比		0.5791					
軸の重心		第1群 1.0178					
		第2群 -0.5598					
的中率		85.5					

(3)主桁劣化状態判定要因における重回帰分析
 数量化 類分析の結果をもとに、 R_9 (劣化状態)を目的変数、 R_1, R_2, R_4, R_7 (変状)を説明変数として重回帰分析を行った。その結果を表-4に示す。重相関係数、T値などをもとに判断すると、この変数での重回帰分析は適当と言える。念のため全変数を用いて重回帰分析を行った結果と比較しても適当であることがわかった。各変数の偏回帰係数の大きさを比較すると、 R_1 が最も大きくなっていることがわかり、重回帰分析の結果からも劣化状態を判断する際に、 R_1 (主鉄筋腐食ひび割れ)が最も考慮されていることがわかる。

表-4 重回帰分析結果

変数名	平均	偏回帰係数	F値	T値	P値	判定	標準誤差
R_9	0.46						
R_1	0.53	0.30145584	11.9202	3.4526	0.0011	**	0.087314
R_2	0.62	0.20026439	6.4498	2.5396	0.0138	*	0.078856
R_4	0.73	0.23249273	8.0732	2.8413	0.0062	**	0.081825
R_7	0.75	0.26766671	13.3637	3.6556	0.0006	**	0.07322
定数項		-0.194236	7.4690	2.7330	0.0083	**	0.071072

決定係数	0.7080
重相関係数	0.8414

**: 1% 有意
 *: 5% 有意

3.3 主桁の耐荷性、使用性における重回帰分析

図-2に示すアンケート調査の流れから、耐荷性、使用性の点数の判断は劣化状態の点数により行われていると考えられる。そこで、主桁の劣化状態と耐荷性、使用性との関係性を調べた。図-7に R_{10} (耐荷性)、 R_{11} (使用性)を目的変数、 R_9 (劣化状態)を説明変数として回帰分析を行った結果と、グラフを示す。耐荷性、使用性はほぼ同様の傾向を示しており、劣化状態と耐荷性、使用性間の相関性も高いことがわかる。

3.4 健全性における重回帰分析

図-7に示すように劣化状態、耐荷性、使用性間に相関が確認できたので、それぞれ劣化状態、耐荷性、使用性と健全性との関係性について調べた。図-8に R_{12} (健全性)を説明変数、全桁の R_9 (劣化状態)、 R_{10} (耐荷性)、 R_{11} (使用性)を目的変数として回帰分析を行った結果と、グラフを示す。ここで図中の平均値、最悪値とは全桁の評価値の平均を用いた場合と、最も評価の悪い桁の値を用いた場合を示している。平均値、最悪値どちらの場合においても劣化状態が

最も健全性との関係性を示している事が言える。

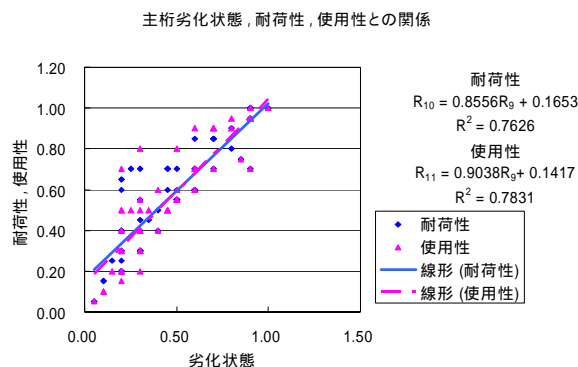
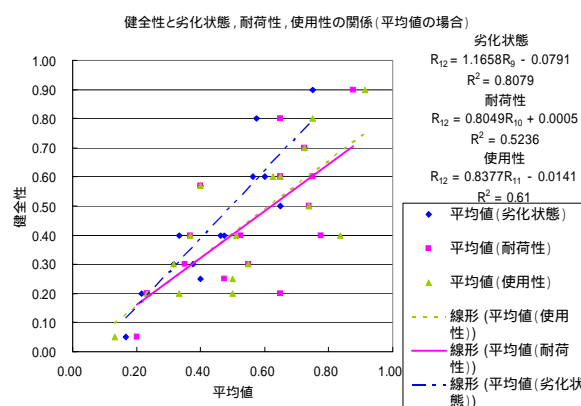
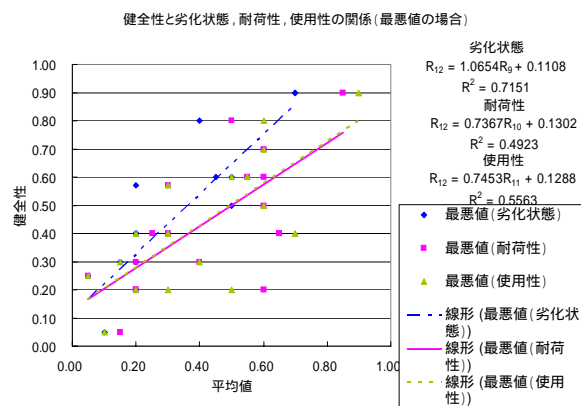


図-7 主桁の劣化状態と耐荷性、使用性との関係



(a) 平均値を用いた場合



(b) 最悪値を用いた場合

図-8 主桁の劣化状態、耐荷性、使用性と健全性の関係

3.5 アンケート結果と安全性指標 との比較

今回のアンケート調査と同時に行った現場試験のデータを用いて主鉄筋の腐食量の推定、劣化予測等を行い、別途求められた安全性指標¹⁾との比較を行った。安全性指標は、耐荷力から断面力を引いたもので表される安全余裕値の平均値を標準偏差で除したものである。その結果を図-9に示す。ただしB橋X桁については増桁であり、他の桁と条件が異なるので、今回の

安全性指標 を用いた評価からは除いている。アンケート調査から求めた数値については、表-4、図-7 の式を用いて行い、今回のアンケート調査の管理者の各変状の平均点を入力値とした。安全性の低下に伴い、それと同様の傾向でアンケート結果の耐荷性が低下しているのがわかる。A 橋の安全性評価では A, B 桁の劣化が大きく、不確定性が大きいいため、C 桁における の相違が大きくなっていると考えられる。

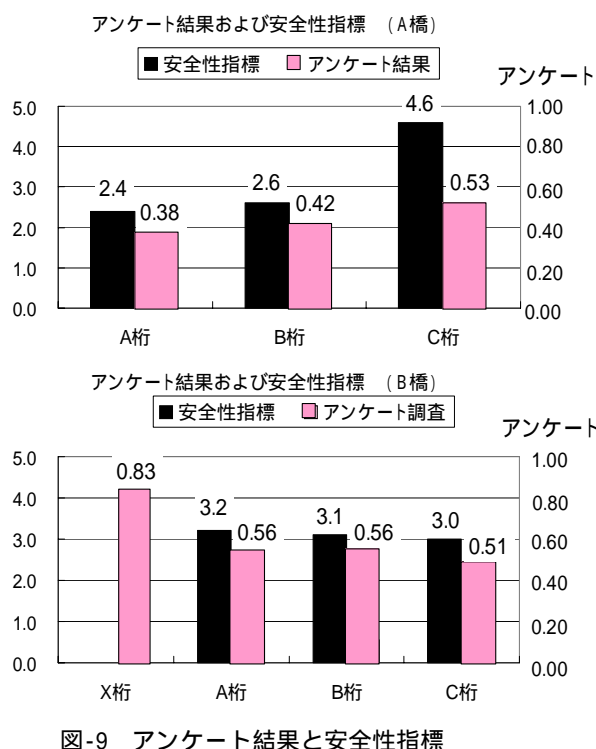


図-9 アンケート結果と安全性指標

4. まとめ

本研究は、塩害劣化した RC 橋の健全性の簡易評価手法の 1 つとして、2 橋の塩害劣化 RC 橋に対して橋梁の管理者を対象としたアンケート調査を行い、そのデータをもとに多変量分析を用いて評価手法の分析、評価モデルの作成を行ったものである。以下に結果をまとめる。

- (1) 劣化状態 変状の関係を調べる際に、得られたサンプル数が少ないので、数量化 類分析の結果をもとに重回帰分析を行った。段階を踏んで分析を行うことにより、少ないサンプルからも傾向を読み取ることができた。
- (2) 数量化 類分析および重回帰分析より、橋梁管理者は主桁の変状から劣化状態を判定す

- る際に、せん断よりも曲げに関する変状を考慮して判定していることがわかった。また、曲げの変状の中でも主鉄筋のひび割れ、浮き、はく離・はく落に着目している事がわかった。
- (3) 回帰分析より、橋梁管理者が主桁の耐荷性、使用性を評価する際に、主桁の劣化状態を考慮していることがわかった。その際、耐荷性、使用性の評価の傾向は同じようなものになることもわかった。
- (4) 回帰分析より、橋梁の管理者は健全性を評価する際に、主桁の劣化状態、耐荷性、使用性を考慮している事がわかった。その中でも特に劣化状態との相関性が高い事がわかった。
- (5) アンケート調査と安全性指標 の結果比較を行い、アンケート調査の有効性の検討を行った。安全性の低下に伴い、それと同様の傾向でアンケート結果の耐荷性が低下しているのがわかる。A 橋の安全性評価では A, B 桁の劣化が大きく、不確定性が大きいいため、C 桁における の相違が大きくなっていると考えられる。

今後の課題として、サンプル数を増やすことまた様々な劣化レベルの橋に対し行うことによって、信頼性の向上に努める必要がある。

参考文献

- 1) 小島大祐，森川英典，岡本早夏，岸紗百合：現場試験に基づいた RC 橋梁における塩害劣化予測と安全性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.127，No.2，2005.6.
- 2) 尾崎健，森川英典：鉄筋腐食劣化を有する RC 橋の評点化手法による性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，2005.6.
- 3) 内田一郎：土木計画学序説，森北出版株式会社，p.65-69，1979.2.
- 4) 社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕に準拠した維持管理マニュアル(その 1)および関連資料，p.6，2003.11.
- 5) 菅民郎：すべてがわかるアンケートデータの分析，現代数学者，p.271，2004.1.